

На правах рукописи

ДМИТРИЕВ Павел Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ
ПРИЕМНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ**

Специальность 01.04.01: «Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

МОСКВА - 2009

Работа выполнена в Институте радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Кошелец Валерий Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент
Корнев Виктор Константинович

кандидат физико-математических наук
Масленников Юрий Васильевич

Ведущая организация:

Московский педагогический государственный университет (МПГУ)

Защита состоится «06» марта 2009 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д.002.231.03 при Институте радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая,
д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН.

Автореферат разослан «06» февраля 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета
Д.002.231.03 при ИРЭ РАН

кандидат физико-математических наук



М.И. Перцовский

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Одним из наиболее перспективных и активно развивающихся направлений современной сверхпроводниковой микроэлектроники является создание сверхчувствительных приёмных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн на основе джозефсоновских туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС переходы). Благодаря высокой нелинейности характеристик, низкому уровню собственных шумов, чрезвычайно малыми временами переключений из сверхпроводящего состояние в нормальное и криогенным рабочим температурам стало возможным создание устройств, предельная чувствительность которых ограничена только лишь квантовым пределом. Такие приёмные устройства являются наиболее чувствительными во всём миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. В настоящий момент уже созданы устройства с шумовой температурой лишь в несколько раз превосходящими квантовый предел, что на порядок ниже, чем, например, у приемников на основе диодов Шоттки. Такие устройства являются незаменимыми в области радиоастрономии, мониторинга окружающей среды, медицины и биологических исследований.

Использование длинных джозефсоновских переходов, работающих в режиме вязкого течения магнитных вихрей, в качестве генератора гетеродина позволяет создавать компактные интегральные приёмные устройства, которые наилучшим образом подходят для приемных систем бортового базирования.

Известно много типов слабосвязанных джозефсоновских структур, однако наибольшее применение в современной низкотемпературной сверхпроводниковой электронике получили туннельные переходы на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb. В настоящий момент уже разработана и успешно используется надёжная технология изготовления высококачественных

туннельных джозефсоновских переходов на основе этой структуры со стабильными и хорошо воспроизводимыми параметрами, благодаря чему стало возможно создание реальных приёмных устройств с уникальными СВЧ характеристиками.

Однако дальнейшее развитие сверхпроводниковой СВЧ электроники предъявляет всё более высокие требования к параметрам и качеству туннельных структур, а так же к более глубокому пониманию протекающих в них физических процессов. Для реализации приборов с новыми рекордными характеристиками необходима разработка новых видов технологических процессов, позволяющих изготавливать переходы высокого качества с предельными параметрами и чрезвычайно высокой плотностью туннельного тока (более 10 кА/см²). Для дальнейшего продвижения в область более высоких рабочих частот, необходим поиск новых материалов с более высокими значениями критической температуры по сравнению с ниобием. В настоящее время наиболее подходящими кандидатами для этой цели являются структуры на основе плёнок NbN и NbTiN с использованием искусственных барьеров из AlN и MgO.

Цель работы

Целью данной диссертационной работы являлось:

- Изучение влияния толщины нормального слоя барьерного алюминия и толщины нижнего ниобиевого электрода в структуре Nb/Al-AlO_x/Nb на основные характеристики туннельных джозефсоновских переходов и сравнение полученных результатов с теоретическими расчётами, сделанными на основе микроскопической теории близости. Изучение влияния дополнительного слоя алюминия в нижнем ниобиевом электроде на характеристики переходов и разработка технологии изготовления переходов с минимальным значением так называемой «колленообразной особенности» вольтамперных характеристик СИС переходов.

- Разработка технологии изготовления высококачественных СИС переходов на основе структур Nb/Al-AlN_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN с плотностью туннельного тока более 10 кА/см² методом нитридации барьерного алюминия в высокочастотном плазменном разряде в среде чистого азота. Изучение влияния различных технологических параметров процесса нитридации на характеристики переходов. Разработка технологии изготовления переходов с высокой плотностью тока и более высоким значением щелевого напряжения V_g на основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN.

- Разработка технологии изготовления СИС переходов на основе плёнок NbN в качестве обоих электродов туннельных джозефсоновских структур с использованием искусственного барьера из MgO.

Научная новизна

- Было проведено комплексное исследование вольтамперных характеристик туннельных джозефсоновских переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb, впервые систематически изучено влияние толщин различных слоёв структуры на вольтамперные характеристики СИС-переходов, проведено сравнение с теоретическими зависимостями, построенными на базе микроскопической теории близости.

- Впервые был разработан и изготовлен криогенный генератор гетеродина на основе длинного джозефсоновского Nb/Al-AlN_x/NbN перехода для интегрального спектрометра субмиллиметровых длин волн с системой фазовой автоподстройки частоты.

Практическая ценность работы

- Разработана методика получения высококачественных СИС-переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb с использованием дополнительного слоя алюминия в базовом ниобиевом электроде с минимальным значением отношения величины тока коленаобразной особенности к скачку тока на щели $I_k/I_g = 0.02$ при значении размытия

щелевого напряжения δV_g менее 150 мкВ. Такие переходы могут быть успешно применены при создании СИС смесителей.

- Разработана методика нитридации барьерного алюминия в высокочастотном плазменном разряде в среде чистого азота. Получены переходы с рекордными, вплоть до 230 кА/см^2 , значениями плотности тока и значением щелевого напряжения $V_g = 3.7 \text{ мВ}$ для Nb/Al-AlN_x/NbN структур, что при переходе на субмикронные размеры СИС переходов позволит создавать приемные СВЧ устройства с рекордными характеристиками.

- Был создан и запатентован криогенный генератор гетеродина на основе длинного джозефсоновского Nb/Al-AlN_x/NbN перехода. Был реализован режим непрерывной перестройки частоты работы такого генератора в диапазоне 350-750 ГГц при автономной ширине излучения менее 5 МГц, что позволяет реализовывать режим фазовой автоподстройки частоты сверхпроводникового генератора. Благодаря высокому, по сравнению с переходами с верхним ниобиевым электродом, значению щелевого напряжения $V_g = 3.7 \text{ мВ}$, возможно потенциально повысить рабочую частоту генератора до 900 ГГц, что является чрезвычайно перспективным для многих применений интегральных спектрометров субмиллиметровых длин волн. К настоящему времени совместно с Институтом космических исследований Нидерландов создан и испытан бортовой спектрометр для исследования атмосферы Земли в режиме наклонного зондирования - проект TELIS (Terahertz Limb Sounder).

- Разработана методика изготовления СИС-переходов с использованием плёнок NbN в качестве обоих электродов туннельных джозефсоновских структур с использованием искусственного барьера из MgO со значениями щелевого напряжения V_g до 4.7 мВ, что потенциально позволяет использовать их в качестве СИС смесителей на частотах вплоть до 1.2 ТГц.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Разработана и оптимизирована технология изготовления высококачественных СИС-переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb с дополнительным слоем алюминия в нижнем базовом ниобиевом электроде, что позволяет изготавливать переходы с минимальной величиной коленообразной особенности вольтамперных характеристик СИС переходов.
- 2) Разработана технология нитридации плёнок алюминия в высокочастотном плазменном разряде в среде чистого азота для использования их в качестве барьера в туннельных джозефсоновских СИС-переходах на основе структур Nb/Al-AlN_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN с высокой плотностью критического тока.
- 3) Разработана технология изготовления переходов на основе структуры NbN/MgO/NbN с более высокими, по сравнению с ниобиевыми переходами, значениями щелевого напряжения.

Вопросы авторства и публикация результатов

В работах [A1, A6] автором была оптимизирована технология изготовления СИС-переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb с дополнительным слоем алюминия в нижнем базовом ниобиевом электроде. Были изготовлены экспериментальные образцы с отношением величины тока коленообразной особенности к скачку тока на щели $I_k/I_g = 0.02$ при значении размытия щелевого напряжения δV_g менее 150 мкВ.

В работе [A2] автором было изготовлено и измерено несколько экспериментальных серий образцов СИС-переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb с различными значениями толщин слоев и различными площадями переходов. Был проведен систематический анализ полученных ВАХ и проведено сравнение полученных результатов с теоретическими кривыми, построенными на основе микроскопической теории эффекта близости. Была оптимизирована технология изготовления СИС-переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb с дополнительным слоем алюминия в

нижнем базовом ниобиевом электроде с целью получения высококачественных СИС переходов с минимальными значениями колленообразной особенности вольтамперных характеристик СИС переходов.

В работах [A3, A4, A8, A12-A15, A17, A18, A20 – A27] автор принимал участие в оптимизации технологии и изготовлении экспериментальных образцов с заданными параметрами.

В работах [A5, A7, A10, A11, A16] автор принимал участие в исследовании электрофизических свойств плёнок NbN, полученных методом реактивного магнетронного напыления в среде смеси аргона с азотом.

В работе [A9] автор принимал участие в оптимизации технологии изготовления СИС-переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb.

В работе [A19] была исследована, разработана и оптимизирована технология нитридации плёнок алюминия в высокочастотном плазменном разряде в среде чистого азота. Был изготовлен и померен ряд экспериментальных серий СИС переходов на основе структур Nb/Al-AlN_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN. Было исследовано влияние различных технологических параметров на свойства СИС переходов. Получены зависимости плотности критического тока переходов от мощности плазменного разряда и времени нитридации.

Апробация работы

Результаты представленных в диссертации исследований докладывались на следующих международных и российских конференциях:

- Applied Superconductivity Conference (ASC' 98, 00, 02, 04, 06, 08)
- European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS' 99, 01, 03, 05)
- International Superconductive Electronics Conference (ISEC'01, 03, 05)
- 19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08)

Публикации

Основные результаты проведённых исследований опубликованы в 27 работах, список которых приведён в конце автореферата.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитированной литературы. Работа содержит 96 страниц, 25 рисунков, 4 таблицы и список цитируемой литературы из 57 работ.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и определены её цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту. Рассмотрены вопросы авторства в публикациях результатов.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приводится краткое описание физических процессов и фундаментальных соотношений лежащих в основе эффектов Джозефсона. Дается классификация слабосвязанных структур по типу и способу формирования слабых связей. Рассматриваются проблемы выбора материалов для планарных СИС структур, как наиболее перспективных с точки зрения современной сверхпроводниковой электроники. Приводится стандартный технологический маршрут изготовления джозефсоновских туннельных СИС переходов, разработанный и успешно применяемый в ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова. Даны определения основным параметрам СИС переходов. Кратко рассмотрены основные принципы работы СИС переходов в качестве активных элементов СВЧ приёмных устройств на основе квазичастичной нелинейности. Определены требования, предъявляемые к СИС переходам, как активным элементам квазичастичных СВЧ приёмных устройств и сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальному изучению эффекта близости в СИС переходах на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb. Рассмотрены основные параметры, определяющие плотность состояний на границе нормальный металл–сверхпроводник при реализации условий

грязного предела, когда длина свободного пробега электронов в нормальном металле и сверхпроводнике много меньше их длин когерентности ($l_{N,S} \ll \xi_{N,S}$). Влияние нормальных слоёв структурах сверхпроводник - нормальный металл – изолятор - сверхпроводник (СНИС), к которой, в частности, относится и структура Nb/Al-AlO_x/Nb может быть задано тремя параметрами: T_C^N/T_C^S - отношение критических температур нормального металла и сверхпроводника, параметр подавления $\gamma = \frac{\rho_S \xi_S}{\rho_N \xi_N}$, характеризующий степень подавления сверхпроводимости в структуре нормальный металл–сверхпроводник, и $\gamma_B = \frac{R_B}{\rho_N \xi_N}$ - описывает степень прозрачности границы нормальный металл-сверхпроводник, где R_B - удельное сопротивление границы нормальный металл-сверхпроводник, $\rho_{S,N}$ и $\xi_{S,N}$ – удельные сопротивления и длины когерентности сверхпроводника и нормального металла.

Далее описана методика проведения эксперимента. Показана зависимость величины коленообразной особенности (КО) I_k/I_g от площади переходов. Приведены экспериментальные данные по зависимости величины КО вольтамперных характеристик СИС переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb от толщин нижнего ниобиевого электрода и барьерного алюминия. Проведено сравнение полученных экспериментальных и теоретических данных, рассчитанных на основе микроскопической теории эффекта близости. Было установлено, что наилучшее соответствие теоретических и экспериментальных данных реализуется при параметрах $\gamma = 0.3$, $\gamma_B = 1$, $\xi_{Nb} = 15$ нм, $\xi_{Al} = 40$ нм. На рисунке 1 показаны теоретические и экспериментальные зависимости величины КО от толщин нижнего ниобиевого электрода и барьерного алюминия. Экспериментальная зависимость КО близка к теоретической до значений толщины нижнего электрода ~ 200 нм. При более толстых слоях нижнего электрода наблюдается снижение I_k/I_g , в то время как теоретическая зависимость

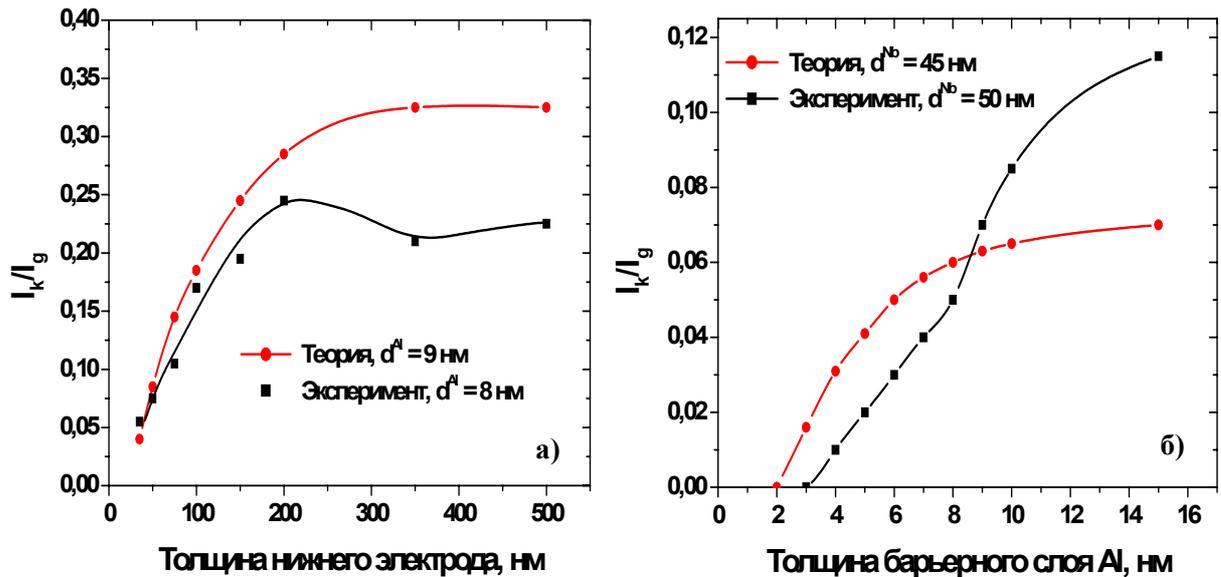


Рис. 1 Теоретические и экспериментальные зависимости коленообразной особенности от толщин нижнего ниобиевого электрода (а) и барьерного алюминия (б).

выходит на определённый максимальный уровень и далее практически не изменяется. Возможно, это связано с ростом структурных неровностей на поверхности нижнего ниобия при увеличении толщины и образованием значительных неоднородностей барьерного слоя алюминия. Изменение значения щелевого напряжения V_g близко к теоретическому во всём интервале исследуемых толщин.

В интервале толщин барьерного алюминия от 3 до 8 нм изменение экспериментальных значений I_k/I_g близко к линейному, но затем происходит значительное возрастание величины КО и, начиная со значений $d^{Al} > 9$ нм, КО становится значительно больше своих расчётных значений. Такое поведение зависимости может быть объяснено переходом механизма рассеивания электронов в плёнках алюминия с ростом толщины слоя, от поверхностного - к объёмному. Также возможно увеличение плотности состояний нормальных электронов на границе Nb-Al благодаря неупругому рассеиванию электронов или наличию неоднородного распределения энергетической щели ниобия по площади перехода. В тоже время изменение щелевого напряжения V_g хорошо согласуется с теоретическими расчетами

Далее описана структура с дополнительным слоем алюминия в нижнем ниобиевом электроде СИС перехода. За счет эффекта близости, вносимого этим слоем, происходит выравнивание плотностей состояний нормальных электронов на границе нижнего электрода с барьерным алюминием, и параметр порядка становится пространственно однородным, что приводит к почти полному исчезновению коленообразной особенности. Структура в этом случае имеет вид $Nb/Al^a/Nb^a/Al-AlO_x/Nb$. Основная технологическая задача состояла в оптимизации толщин слоев Al^a и Nb^a для получения наилучших характеристик СИС переходов. Оптимизация осуществлялась эмпирически, и наилучшие результаты были получены при толщине дополнительного слоя алюминия $d^{Ala} = 5$ нм и толщине дополнительного слоя ниобия $d^{Nba} = 50$ нм. Суммарная толщина нижнего электрода составляла 200 нм. Вольтамперная характеристика такого перехода приведена на рисунке 2. На основе этой структуры был изготовлен широкополосный СИС смеситель, работающий в диапазоне частот $75 \div 120$ ГГц с шумовой температурой ~ 40 К [A1].

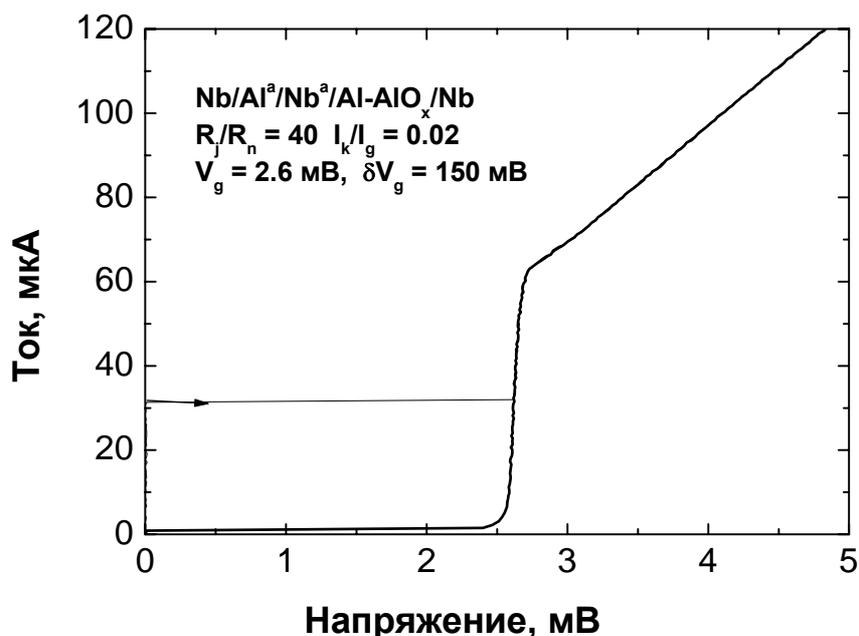


Рис. 2 Вольтамперная характеристика перехода на основе структуры $Nb/Al^a/Nb^a/Al-AlO_x/Nb$.

Третья глава посвящена разработке методики изготовления и экспериментальному исследованию СИС переходов на основе структур Nb/Al-AlN_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN.

Для дальнейшего улучшения частотных характеристик СИС смесителей, таких как ширина входной полосы смесителя, требуются туннельные СИС переходы с минимальной степенью влияния шунтирующей ёмкости, которая определяется параметром $\gamma_c = 2\pi \cdot f \cdot R_n \cdot A \cdot C_{eff}$. Для решения этой задачи требуются СИС переходы с высокой плотностью тока (низкими значениями $R_n A$) при сохранении приемлемого качества переходов ($R_j/R_n > 10$). Однако для традиционных переходов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb при достижении значений $R_n A$ порядка 20 Ом·мкм² происходит резкая деградация вольтамперных характеристик переходов.

Наиболее перспективным материалом, способным успешно заменить термически сформированный барьерный AlO_x, в настоящее время является AlN_x, получаемый методом нитридации слоя алюминия в плазменном разряде в среде азота. Такой диэлектрический слой обладает более низкой высотой потенциального барьера по сравнению с AlO_x ($\phi_{AlN} \sim 0.88$ eV, $\phi_{AlO_x} \sim 2$ eV) и близким значением диэлектрической постоянной $\epsilon \sim 8.5$, что позволяет заменить барьер Al-AlO_x без модификации настроечных цепей СВЧ устройств. К тому же, изготовление СИС переходов с барьером Al-AlN_x возможно практически по той же технологии, что и переходы с барьером Al-AlO_x.

Другим важным преимуществом барьера Al-AlN_x является возможность использования NbN в качестве верхнего электрода туннельной структуры. Это позволяет увеличить щелевое напряжение перехода с 2.8 мВ для структур Nb/Al-AlN/Nb до 3.7 мВ для Nb/Al-AlN/NbN переходов, т.к. значение энергетической щели для ниобия составляет $\Delta_{Nb} = 1.4$ мВ, а для нитрида ниобия $\Delta_{NbN} = 2.3$ мВ при температуре 4.2 К. Тем самым, возможно существенное повышение верхней частотной границы работы СВЧ устройств

согласно условию $f < f_g = 2eV_g/h$. Для переходов с барьером Al-AlO_x использование NbN в качестве верхнего электрода приводит к деградации его сверхпроводниковых свойств в приграничном к барьеру слое из-за диффузии избытка кислорода с поверхности слоя AlO_x.

Далее приводится подробное описание методики формирования барьера Al-AlN_x. Схема процесса нитридизации барьерного алюминия в плазменном разряде приведена на рисунке 3. В процессе формирования барьера AlN_x, поверхность алюминия взаимодействует с ионами азота, состоящими в основном из ионов N₂⁺ и небольшой доли (несколько процентов) ионов N⁺, которые взаимодействуют с поверхностными атомами алюминия и диффундируют вглубь барьерного слоя. Скорость роста слоя AlN_x зависит от концентрации ионов азота у поверхности подложки их энергии, что определяется мощностью плазменного разряда, и экспоненциально падает по мере увеличения толщины барьера.

В ходе эксперимента исследовались зависимости плотности тока переходов Nb/Al-AlN_x/Nb от мощности плазменного RF заряда и времени процесса нитридизации при фиксированном значении давления азота равном

3×10^{-2} мбар. Было изготовлено несколько серий тестовых образцов с переходами площадью 3 мкм².

В ходе данной работы было также проведено исследование зависимости значения $R_n A$ переходов на основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN от времени нитридизации при мощности RF-разряда 70 Вт и давлении азота 3×10^{-2} мбар. Установлено,

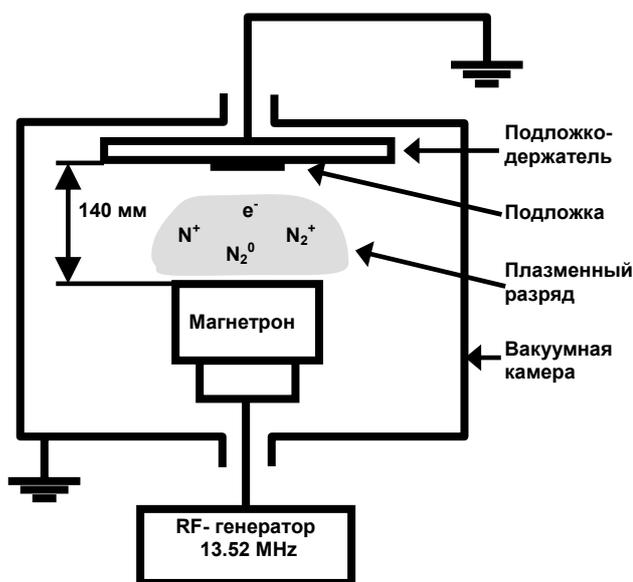


Рис. 3 Схема процесса нитридизации барьерного алюминия в плазменном разряде.

что при тех же самых режимах процесса нитридации, значение $R_n A$ для Nb/Al-AlN_x/NbN переходов в несколько раз больше, чем для переходов Nb/Al-AlN_x/Nb. Это, видимо, происходит из-за процесса диффузии атомов азота с поверхности слоя AlN_x в приграничные слои верхнего ниобиевого электрода в структурах Nb/Al-AlN_x/Nb, а в структурах с верхним электродом из нитрида ниобия этот процесс выражен в значительно меньшей степени. В пользу этого предположения говорит тот факт, что качество Nb/Al-AlN_x/NbN переходов значительно выше, чем качество переходов с верхним электродом из ниобия. На рисунке 4 приведены зависимости отношения R_j/R_n от параметра $R_n A$ для переходов различного типа. Переходы на основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN обладают значительно более высоким отношением R_j/R_n при низких значениях $R_n A$, чем переходы на основе структур Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/Nb. Таким образом, хорошее качество при высоких плотностях тока и более высокое по сравнению с ниобиевыми переходами значение щелевого напряжения, делает переходы на основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN весьма перспективными для создания сверхпроводниковых СВЧ устройств.

Далее рассмотрены принципы работы сверхпроводниковых генераторов гетеродина (СГГ) на основе длинного джозефсоновского

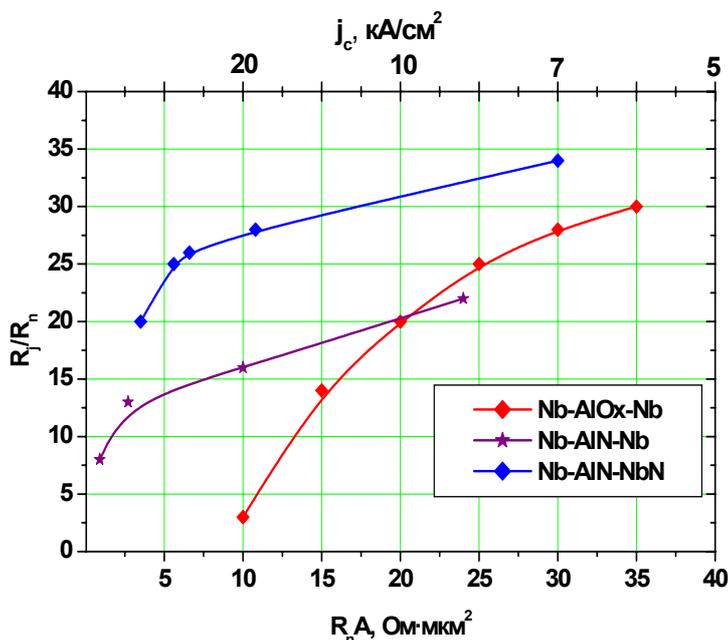


Рис. 4 Зависимости отношения R_j/R_n от значения $R_n A$ для СИС переходов различного типа структур.

перехода (ДДП), длина которого L много больше его ширины W и джозефсоновской глубины проникновения магнитного поля λ_J .

Ранее в ИРЭ РАН была предложена концепция полностью сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), в котором на одной микросхеме объединены приемная антенна, СИС смеситель, работающий в квантовом режиме преобразования частоты, и сверхпроводниковый генератор гетеродина на основе ДДП. При подаче постоянного питания от батарей микросхема такого приемника работает как супергетеродинный приемник в субмиллиметровом диапазоне длин волн, не требуя никакого дополнительного СВЧ оборудования, что означает значительное сокращение габаритов, массы и потребляемой мощности приемных устройств.

Такие интегральные приёмники в диапазоне 300 - 700 ГГц продемонстрировали параметры на уровне лучших сверхпроводниковых СИС приемников с внешним гетеродином. Однако, из-за эффекта джозефсоновской самонакачки, ширина линии генерации СГГ на основе Nb/Al-AlO_x/Nb переходов в области частот 470 ÷ 550 ГГц, соответствующей области трети щели, превышает 5 МГц, что делает невозможной реализацию режима фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) генератора с достаточно высоким спектральным качеством в этом частотном диапазоне. Особенно сильно эффект джозефсоновской самонакачки в области трети щели проявляется при увеличении плотности тока выше порядка 10 кА/см², которая является оптимальной для СИС смесителей субмиллиметрового диапазона длин волн. Кроме того, в области частот ниже 450 ГГц становится невозможной плавная перестройка частоты таких СГГ, что связано с наличием резонансных ступеней Фиске. Все это делает работу интегрального спектрометра с СГГ на основе Nb/Al-AlO_x/Nb переходов в диапазоне частот 350-550 ГГц неэффективной. Однако этот диапазон является чрезвычайно важным для практических приложений, в частности для мониторинга атмосферы Земли с борта высотных аэростатов. Поэтому был разработан СГГ на основе Nb/Al-AlN_x/NbN переходов [A23-A27].

В ДДП на основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN проблематичная область трети щели смещена в диапазон 610÷660 ГГц, а ступеньки Фиске, благодаря более высокому параметру затухания α в таких переходах, имеют заметный наклон. Это позволяет установить любую частоту резонансной области работы ДДП и реализовать систему автоматической подстройки частоты СГГ в резонансном режиме, но для каждой частоты значения тока смещения должны лежать в определенных пределах. Хотя это и затрудняет настройку СГГ, затраченные усилия окупаются шириной линии генерации менее 3 МГц во всем диапазоне от 350 до 600 ГГц. На рисунке 5 приведены зависимости ширины линии генерации СГГ от частоты для структур Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN.

Следует также отметить, что использование СИС переходов на основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN в качестве СГГ не вносит дополнительных шумов в работу СИП, а высокое, по сравнению с Nb/Al-AlO_x/Nb переходами значение щелевого напряжения $V_g = 3.7$ мВ, позволяет потенциально расширить частотный диапазон работы СГГ до 900 МГц (при использовании линий передачи из нитрида ниобия).

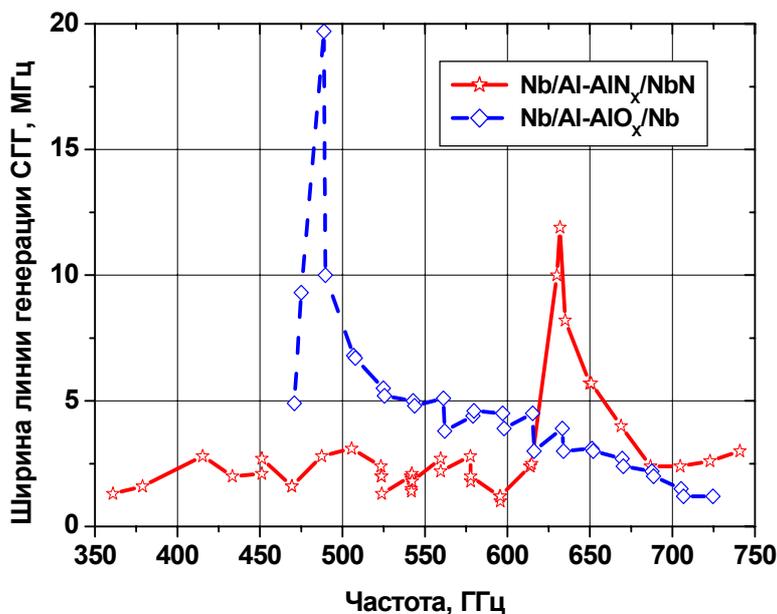


Рис. 5 Зависимости ширины линии генерации СГГ от частоты для структур Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN. (Измерения выполнены М.Ю. Торгашиным).

Четвёртая глава посвящена разработке методики изготовления и экспериментальному исследованию СИС переходов на основе структуры NbN/MgO/NbN.

Для дальнейшего расширения верхней частотной границы работы СВЧ устройств необходимы туннельные СИС переходы с более высоким значением щелевого напряжения V_g , зависящего от критической температуры материалов электродов. Наиболее перспективным в настоящий момент направлением в этой области является полная замена ниобиевых электродов СИС переходов на NbN или NbTiN. К достоинствам NbN можно отнести его высокую жесткость, химическую стойкость, устойчивость к термоциклированию и значительно более высокую по сравнению с ниобием критическую температуру ($\sim 15 \div 16$ К). Плёнки NbN относительно легко получают методом реактивного распыления ниобия в среде смеси аргона с азотом. Недостатками являются: малая длина когерентности $\xi_{NbN} \sim 4-7$ нм, большая лондоновская глубина проникновения магнитного поля $\lambda_{NbN} \sim 180$ нм, высокое значение удельного сопротивления $\rho_{NbN} > 60$ мкОм·см, а также зависимость их электрофизических свойств и кристаллической структуры от параметров процесса напыления и условий роста.

Другая технологическая проблема, возникающая при использовании NbN в качестве нижнего электрода СИС структурах, связана с необходимостью формирования ультратонких диэлектрических слоёв в качестве искусственного туннельного барьера. Применение барьеров Al-AlO_x или Al-AN_x приводит к сильному подавлению сверхпроводниковых свойств NbN в приграничных к алюминию слоях и деградации вольтамперных характеристик переходов, что вызвано сильным эффектом близости между этими материалами.

Далее приводится описание методики изготовления СИС переходов на основе структуры NbN/MgO/NbN. В ходе работы были откалиброваны и использованы три режима напыления барьерного MgO с различными

скоростями осаждения и исследованы зависимости значения $R_n A$ переходов на основе структуры NbN/MgO/NbN от толщины барьерного слоя MgO, напылённого с различной скоростью. Толщина барьера определялась по времени напыления. В результате получены переходы со значениями $R_n A$ до 20 Ом·мкм². На рисунке 6 приведены зависимости значения $R_n A$ от средней толщины барьерного MgO для различных режимов напыления. При снижении скорости напыления MgO до 1.8 Å/мин происходит резкое уменьшение толщины барьерного слоя, что связано, видимо, с уплотнением кристаллической структуры. В целом, несмотря на высокую шероховатость поликристаллических плёнок MgO, получаемых на кремниевых подложках со слоем аморфного Al₂O₃, удалось получить туннельные переходы с толщиной барьерного слоя ~ 8.5 Å. Однако такие переходы малопригодны для практических применений. Для получения более качественных переходов с меньшим разбросом параметров и более высокими характеристиками необходимо использовать эпитаксиальные плёнки, выращенные на монокристаллических подложках MgO.

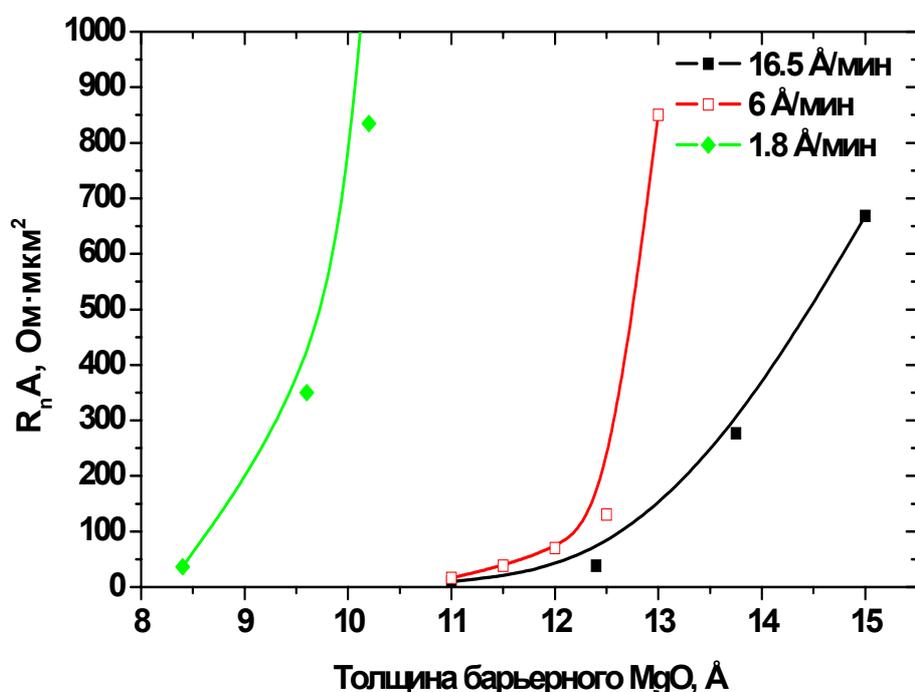


Рис. 6 Зависимость значения $R_n A$ переходов на основе структуры NbN/MgO/NbN от толщины барьерного MgO, напыленного в различных режимах.

Основные результаты работы

Представленная диссертационная работа посвящена технологическим аспектам создания интегральных приёмных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн на основе сверхпроводниковых структур из тугоплавких металлов. В процессе выполнения работы были получены следующие основные результаты:

1) Изучено и систематизировано влияние толщин слоев в трёхслойных структурах Nb/Al-AlO_x/Nb на основные параметры СИС-переходов и проведено сравнение вольтамперных характеристик туннельных джозефсоновских переходов на основе этих структур с теоретическими кривыми, построенными на базе микроскопической теории эффекта близости. Экспериментально определены и теоретически обоснованы условия полного подавления так называемой коленообразной особенности на щели вольтамперных характеристик переходов. Было изучено влияние дополнительного слоя алюминия в базовом электроде на свойства туннельного перехода в зависимости от его толщины и расстояния от барьера и изготовлены высококачественные переходы с отношением величины тока коленообразной особенности к скачку тока на щели $I_k/I_g = 0.02$ при значении размытия щелевого напряжения δV_g менее 150 мкВ. Полученные результаты демонстрируют, что вольтамперные характеристики туннельных переходов могут быть оптимизированы путем подбора подходящих толщин слоев в многослойном базовом электроде.

2) Разработана и оптимизирована технология нитридации плёнок алюминия в высокочастотном плазменном разряде в среде чистого азота для использования их в качестве барьера в туннельных джозефсоновских СИС-переходах на основе тугоплавких материалов. Были получены высококачественные туннельные переходы на основе структур Nb/Al-AlN_x/Nb и Nb/Al-AlN_x/NbN с высокой плотностью критического тока. Было

исследовано влияние различных технологических параметров на свойства СИС-переходов. Получены зависимости плотности критического тока переходов от мощности плазменного разряда и времени нитридации. Для структуры Nb/Al-AlN_x/Nb были получены туннельные переходы с рекордной плотностью тока $j_c = 230$ кА/см² и отношением сопротивления утечки R_j к нормальному сопротивлению R_n , $R_j/R_n = 8$. При плотности тока $j_c = 70$ кА/см² для структур Nb/Al-AlN_x/Nb было получено отношение $R_j/R_n = 12$, при той же плотности тока отношение $R_j/R_n = 20$ для структур Nb/Al-AlN_x/NbN.

3) На основе структуры Nb/Al-AlN_x/NbN был разработан и изготовлен криогенный генератор гетеродина на основе распределённого туннельного перехода для интегрального спектрометра субмиллиметровых длин волн с системой фазовой автоподстройки частоты. Применение плёнки NbN в качестве верхнего электрода трёхслойной структуры позволило существенно расширить рабочую область частот сверхпроводникового генератора гетеродина. Был реализован режим непрерывной перестройки частоты работы генератора в диапазоне 350-750 ГГц при автономной ширине излучения менее 5 МГц. Показано, что использование электрода из нитрида ниобия не приводит к появлению дополнительных шумов. Высокое, по сравнению с переходами с верхним ниобиевым электродом, значение щелевого напряжения $V_g = 3.7$ мВ позволяет потенциально повысить рабочую частоту генератора до 900 ГГц.

4) Разработана технология изготовления переходов на основе структур NbN/MgO/NbN с более высокими, по сравнению с ниобиевыми переходами, значениями щелевого напряжения с целью дальнейшего расширения частотного диапазона работы сверхпроводниковых СВЧ приёмных устройств. Получены переходы со значениями щелевого напряжения V_g до 4.7 мВ, что потенциально позволяет использовать их в качестве СИС смесителей на частотах вплоть до 1.2 ТГц. Предложены дальнейшие пути улучшения параметров СИС переходов на основе таких структур.

Публикации по теме диссертации

- [A1]. A.Karpov, A. Blondel, **P. Dmitriev**, V. Koshelets, "A broad band low noise SIS radiometer", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 9, pp. 4225–4228, 1999.
- [A2]. **P. N. Dmitriev**, A. B. Ermakov, A. G. Kovalenko, V. P. Koshelets, N. N. Iosad, A. A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, "Niobium Tunnel Junctions with Multi-Layered Electrodes", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 9, pp. 3970–3973, 1999.
- [A3]. V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin, L. V. Filippenko, **P. N. Dmitriev**, V. L. Vaks, J. Mygind, A. B. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein, "Flux Flow Oscillators for Sub-mm Wave Integrated Receivers", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol 9, pp. 4133–4136, 1999.
- [A4]. A.B. Baryshev, A. V. Yulin, V. V. Kurin, V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin, **P. N. Dmitriev**, L. V. Filippenko, "Cherenkov Flux-Flow Oscillators: Output Power and Linewidth", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 9, pp. 3737–3740, 1999.
- [A5]. N.N. Iosad, A. V. Mijiritskii, V.V. Roddatis, N. M. van der Pers, B.D. Jackson, J. R. Gao, S.N. Polyakov, **P. N. Dmitriev**, and T. M. Klapwijk, "Properties of $(\text{Nb}_{0.35}\text{Ti}_{0.15})_x \text{N}_1$ x thin films deposited on silicon wafers at ambient substrate temperature", *Journal of Applied Physics*, v.38, no. 10, pp. 5756-5759, 2000.
- [A6]. A. Karpov, J. Blondel, **P. Dmitriev**, V. Koshelets, "Heterodyne response in SIS direct detector", Proceeding of the Fourth European Conference of Applied Superconductivity. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, no. 167, vol 2, pp. 631-634, 2000.

- [A7]. N. N. Iosad, V. V. Roddatis, S. N. Polyakov, A. V. Varlashkin, B. D. Jackson, **P. N. Dmitriev**, J. R. Gao, and T. M. Klapwijk, “Superconducting Transition Metal Nitride Films for THz SIS Mixers”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.11, no. 1, pp. 3832-3835, 2001.
- [A8]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, S.V. Shitov, **P.N. Dmitriev**, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, W. Luinge, J. Mygind, V.L. Vaks, D.G. Pavel’ev, “Superfine Resonant Structure on IVC of Long Josephson Junctions and its Influence on Flux Flow Oscillator Linewidth”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.11, no. 1, pp. 1211-1214, 2001.
- [A9]. L.V. Filippenko, S.V. Shitov, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, V.P. Koshelets, and J.R. Gao, “Integrated Superconducting Receiver: fabrication and yield”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.11, no. 1, pp. 816-819, 2001.
- [A10]. N.N. Iosad, B.D. Jackson, S.N. Polyakov, **P.N. Dmitriev**, and T.M. Klapwijk, “Reactive magnetron sputter-deposition of NbN and (Nb, Ti) films related to sputtering source characterization and optimization”, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol 19, no. 4, pp 1840-1845, 2001.
- [A11]. N.N. Iosad, N.M. van der Pers, S. Grachev, M. Zuiddam, B.D. Jackson, M. Kroug, **P.N. Dmitriev**, and T. M. Klapwijk, “Texture formation in sputter-deposited (Nb_{0.7}Ti_{0.3})N thin films”, *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 9, pp. 4999-5005, 2002.
- [A12]. Mygind J, Mahaini C., **Dmitriev P.N.**, Ermakov A.B., Koshelets V.P., Shitov S.V., Sobolev A.S., Torgashin M.Yu., Khodos V.V., Vaks V.L., Wesselius P.R., “Phase-locked Josephson Flux Flow Local Oscillator for Submm Integrated Receivers”, *Superconductor Science and Technology*, v. 15, pp. 1701-1705, 2002.

- [A13]. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, V.V. Khodos, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind, “Towards a Phase-Locked Superconducting Integrated Receiver: Prospects and Limitations”, *Physica C*, vol. 367, pp. 249 - 255, 2002.
- [A14]. Koshelets V.P., **Dmitriev P.N.**, Sobolev A.S., Pankratov A.L., Khodos V.V., Vaks V.L., Baryshev A.M., Wesselius P.R., Mygind J., “Linewidth of Josephson flux flow oscillators”, *Physica C*, vol. 372–376, pp. 316–321, 2002.
- [A15]. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, “Superconducting Integrated Receivers of Submm Waves”, “*Radiofizika*” (in Russian), in press, 2003.
- [A16]. N. N. Iosad, N. M. van der Pers, S. Grachev, M. Zuiddam, B. D. Jackson, M. Kroug, **P. N. Dmitriev**, and T. M. Klapwijk, “Texture Related Roughness of (Nb,Ti)N Sputter-Deposited Films”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 13, no. 2, pp. 3301-3304, 2003.
- [A17]. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.R. Wesselius, P.A. Yagoubov, C. Mahaini, J. Mygind, “Externally Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receivers: Achievements and Limitations”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 13, no. 2, pp.1035-1038 , 2003.
- [A18]. S.V. Shitov, V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, **P.N. Dmitriev**, L.V. Filippenko, P.A. Yagoubov, W.-J. Vreeling, P.R. Wesselius, V.V. Khodos, V.L. Vaks, “An Integrated Receiver with Phase-Locked Superconducting Oscillator”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 13, no. 2, pp. 684-687, 2003.

- [A19]. P.N. Dmitriev, I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko, A.B. Ermakov, S.V. Shitov, G.V. Prokopenko, S.A. Kovtonyuk, and V.P. Koshelets. "High Quality Nb-based Integrated Circuits for High Frequency and Digital Applications", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 2, pp. 107-110, 2003.
- [A20]. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, A.L. Pankratov, V.V. Kurin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen. "Superconducting Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receiver", *Superconducting Science and Technology*, v. 17, pp. S127-S131, 2004.
- [A21]. В.П. Кошелец, **П.Н. Дмитриев**, А.Б. Ермаков, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко, "Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы", *Известия ВУЗов "Радиофизика"*, Том XLVIII, № 10–11, стр. 947-954, 2005.
- [A22]. V.P. Koshelets, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, V.V. Kurin, A.L. Pankratov, J. Mygind, "Optimization of the Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for the Submm Integrated Receiver", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 15, pp. 964-967, 2005.
- [A23]. M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, and P.A. Yagoubov, "Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 17, 2007.
- [A24]. A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, P.A. Yagoubov, and O.M. Pylypenko, "Cryogenic Phase Detector for Superconducting Integrated Receiver", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 606-608, 2007.

- [A25]. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б., **Дмитриев П.Н.**, Ермаков А.Б., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В, Ягубов П.А.,. “Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона длин волн для атмосферных исследований”, *Известия ВУЗов «Радиофизика»*, Том L, № 10–11, стр. 935-940, 2007.
- [A26]. A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, O.M. Pylypenko, and P.A. Yagoubov, “Cryogenic Phase Locking Loop System for Flux-Flow Oscillator”, presented at the *19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08)*, Groningen, the Netherlands, April 2008, report P7-7.
- [A27]. A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets, **P.N. Dmitriev**, A.B. Ermakov, P.A. Yagoubov, O.M. Pylypenko, «Cryogenic Phase Locking Loop System for Superconducting Integrated Receiver», Abstract for the Applied Superconductivity Conference ASC-2008. Chicago, USA, August 2008, report 4EZ07